

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201908024



横风扰动下的跨座式单轨车辆 运行平稳性分析

李 军¹, 魏 睿², 隗 寒 冰¹, 周 伟¹

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074;
2. 重庆交通大学 城市轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 对横风扰动下的跨座式单轨车辆的运行平稳性进行分析. 首先, 分别采用瞬态中国帽风载模型和非定常随机风载模型模拟动态风场, 建立跨座式单轨车辆动力学模型, 并将两种风载模型作为外部激励分别施加到车辆上. 其次, 采取数值仿真方法, 分析不同车速、风速、合成风向角的跨座式单轨车辆在横风作用时的动力响应. 最后, 对车辆运行平稳性进行评估, 计算限值下的临界安全风速, 得到横风扰动下跨座式单轨车辆运行的安全区域. 结果表明: 车速、风速和合成风向角对跨座式单轨车辆的运行平稳性有显著影响; 当车速和风速过大时, 车辆会发生失稳现象.

关键词: 跨座式单轨车辆; 横风扰动; 平稳性; 安全区域

中图分类号: U 270.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2020)03-0285-07

Stability Analysis of Straddle Monorail Vehicle Under Crosswind Disturbance

LI Jun¹, WEI Rui², WEI Hanbing¹, ZHOU Wei¹

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Integration and Control for Urban Rail Transit Vehicle System,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The running stability of a straddle monorail vehicle under crosswind disturbance was analyzed. First, the transient Chinese cap wind load model and the unsteady random wind load model were used to simulate the dynamic wind field, and a straddle monorail vehicle dynamic model was established. The two wind load models as external stimuli were applied to the vehicle, respectively. Second, a numerical simulation method was adopted to analyze the dynamic response of a straddle monorail vehicle under the action of crosswind with different vehicle speeds, different wind speeds, and different synthetic wind direction angles. Finally, the vehicle's running stability was evaluated, the critical safe wind speed under the limit was calculated, and the safety area of straddle monorail vehicle operation under crosswind disturbance was obtained. The results show that the vehicle speed, wind speed and synthetic wind direction angles have a significant impact on the running smoothness of the straddle monorail vehicle. When the vehicle speed and wind speed are too large, the vehicle may experience instability.

Keywords: straddle monorail vehicle; crosswind disturbance; stability; safety area

收稿日期: 2019-08-25

通信作者: 李军(1964-),男,教授,博士,主要从事发动机排放与控制、新能源汽车和智能车辆控制的研究. E-mail: cqleejun@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305472); 重庆市轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室项目(CSTC2015yfpt-zdsys30001)

跨座式单轨交通具有小曲率线径运行的特点,在强横风作用下,跨座式单轨车辆可能脱离行驶轨面.目前,学者们对风荷载作用下的列车安全运行问题已进行了大量研究.彭伟恺等^[1]对3种风载模型下的某型动车组头车侧风安全性进行对比分析,发现瞬态中国帽风载模型适合于我国高速列车的侧风安全评价.王康^[2]引入瞬态中国帽风载模型及其计算方法,建立高速列车动力学仿真模型,对18种工况下的车辆安全性指标进行分析,得到在曲线外侧施加横风、曲线内侧施加横风和无横风等情况下高速列车的曲线通过安全性规律.曹亚博等^[3]研究强阵风环境下高速列车的运行安全与脱轨边界,为阵风环境下高速列车的安全控制提供理论指导.Olmos等^[4]建立一种有效的风-车-桥相互作用模型,并进行实验验证,以确定列车无法安全运行的临界风速和车速.Zhang等^[5]研究基础因素对大跨度斜拉桥风轨车桥系统耦合振动的影响,发现车辆加速度在很大程度上受到风脉动和轨道不规则性的激励影响.

目前,关于风荷载作用下车辆安全性的研究主要集中于高速列车,较少涉及跨座式单轨交通^[6],然而,在车辆模型、轨道线路等方面,跨座式单轨交通与高速列车具有明显的不一致性.基于此,本文对横风激励下的跨座式单轨车辆运行平稳性进行分析,计算限值下的临界安全风速,得到横风激励下跨座式单轨车辆运行的安全区域.

1 风载模型

1.1 瞬态中国帽风载模型

横风激励模型可采用瞬态中国帽风载模型模拟自然界中的动态风场,风载模型中的动态阵风风速由稳定阵风风速和波动阵风风速叠加而成^[7].任意一处的动态阵风风速 u 为

$$u(t) = u_0(t) + u_g(t). \tag{1}$$

式(1)中: u_0 为稳定阵风风速; u_g 为波动阵风风速.

以计算效率为前提,兼顾自然风脉动规律和极端变化情况,将模型进行简化.瞬态中国帽风速时间历程图,如图1所示.图1中: u_{\max} 为动态阵风最大风速; u_{\min} 为动态阵风最小风速; $t_1 \sim t_8$ 为动态阵风风速变化的作用时间; T 为波动阵风持续时间.瞬态中国帽风载模型描述的动态阵风风速可由分段函数表示,即

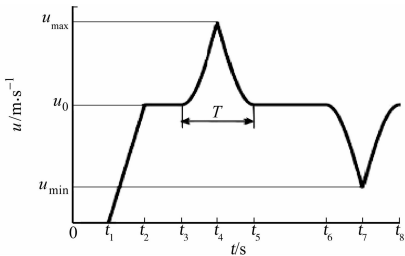


图1 瞬态中国帽风速时间历程图
Fig.1 Time history of transient Chinese cap wind speed

$$u(t) = \begin{cases} 2u_0 t, & t_1 < t < t_2, \\ u_0, & t_2 < t < t_3, \\ Au_0 - u_0(A-1) \cdot \sin(\pi t + 1.5\pi), & t_3 < t < t_4, \\ Au_0 - u_0(A-1) \cdot \sin(\pi t - 1.5\pi), & t_4 < t < t_5, \\ u_0, & t_5 < t < t_6, \\ 2u_0 - Au_0 - u_0(A-1) \cdot \sin(\pi t - 1.5\pi), & t_6 < t < t_7, \\ 2u_0 - Au_0 - u_0(A-1) \cdot \sin(\pi t + 1.5\pi), & t_7 < t < t_8, \\ u_0, & t > t_8. \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中: A 为 u_{\max} 与 u_0 的比值, $A=1.7$.

由速度合成理论可知,合成风速 u_a 和合成风向角 α 可由车速 v 、动态风速 u 和风向角 α_w 合成,即

$$u_a(t) = \sqrt{(v + u(t) \cdot \cos \alpha_w)^2 + (u(t) \cdot \sin \alpha_w)^2}, \tag{3}$$
$$\alpha(t) = \arctan\left(\frac{u(t) \cdot \sin \alpha_w}{v + u(t) \cdot \cos \alpha_w}\right). \tag{4}$$

作用在车辆上的气动载荷可以简化为侧力 F_y 、升力 F_z 、倾覆力矩 M_x 、点头力矩 M_y 和摇头力矩 M_z ,根据准静态理论可得相关公式为

$$\left. \begin{aligned} F_g(t) &= \frac{1}{2} \rho S_0 c_{F_g} \alpha(t) u_a(t)^2, & g \in \{y, z\}, \\ M_p(t) &= \frac{1}{2} \rho S_0 d_0 c_{M_p} \alpha(t) u_a(t)^2, & p \in \{x, y, z\}. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式(5)中: ρ 为空气密度, $\rho=1.225\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$; S_0 为迎风侧单轨车体投影等效面积, m^2 ; d_0 为等效高度, m ; c_{F_g} , c_{M_p} 分别为气动力系数和气动力矩系数。

1.2 非定常随机风载模型

脉动风的风速功率谱是描述风速频率特性的重要参数, 非定常随机风载模型采用经典且较为接近实际的达文波特(Davenport)风谱进行模拟。

Davenport 脉动风功率谱经验表达式为

$$\frac{nS_u(z,n)}{u_*^2} = \frac{4x^2}{(1+x^2)^{4/3}}. \tag{6}$$

式(6)中: n 为脉动风频率; $S_u(z,n)$ 为脉动风风速功率谱; x 为无量纲频率, $x=1\ 200n/u_{\text{ave}}$, u_{ave} 为标准高度 10 m 处的平均风速; $u_*^2=Kx^2$, K 为地面粗糙度系数。

实际测量结果表明, 近地层脉动风速根方差可近似计算, 即 $\sigma_u\approx2.5\sigma_*$, $\sigma_v\approx2.2\sigma_*$, $\sigma_w\approx1.35\sigma_*$ 。

据此, 式(6)又可写为

$$\frac{nS_u(z,n)}{\sigma_u^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{x^2}{(1+x^2)^{4/3}}. \tag{7}$$

风场模拟采用谐波合成法, 为了便于进行快速傅里叶变换(FFT), 改用复指数形式表示, 故一个零均值多变量一维平稳随机过程为

$$f_j(t) = 2\sqrt{\Delta n} \cdot \text{Re} \sum_{k=1}^j \sum_{l=1}^{M-1} H_{jk}(l\Delta\omega) \times \exp(il\Delta\omega t + i\frac{k}{m}\omega t + i\varphi_{kl}), \quad j = 1, 2, \dots, m. \tag{8}$$

令 $B_{jk}(l\Delta\omega) = H_{jk}(l\Delta\omega) \cdot \exp(i\varphi_{kl})$ ($l=0, 1, 2, \dots, M-1$), 则式(8)可写为

$$f_j(q\Delta t) = 2\sqrt{\Delta n} \cdot \text{Re} \sum_{k=1}^j G_{jk}(q\Delta t) \cdot \exp(i\frac{k}{m}\Delta\omega \cdot q\Delta t). \tag{9}$$

式(9)中: $\Delta t = 1/f_s$; $G_{jk}(q\Delta t) = \sum_{l=0}^{M-1} B_{jk}(l\Delta\omega) \cdot \exp(il\Delta\omega \cdot q\Delta t)$ ($q = 0, 1, 2, \dots, N-1$).

据此, 通过 N 点 FFT 进行快速计算, 根据计算结果再通过式(9)即可得到空间 m 点的随机脉动风速场, 实际风速场为随机脉动风速场与当地平均风速之和。

非定常随机风载风速时间历程图(平均风速为 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 如图 2 所示。

根据准静态理论和合成风速理论, 可得到非定常随机风载模型^[8-10]。在跨座式单轨车辆模型中, 风载荷以时间激励函数的方式输入, 作为列车所受的外力激励。

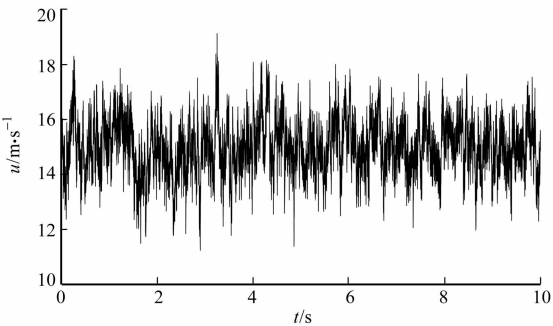


图 2 非定常随机风载风速时间历程图
Fig. 2 Time history of unsteady random wind speed

2 跨座式单轨车辆动力学建模

2.1 跨座式单轨车辆动力学模型

跨座式单轨车辆的组成结构为车体、前后转向架、走行轮轮对、导向轮轮对和稳定轮轮对。走行轮、导向轮和稳定轮均使用橡胶轮胎, 在模型中常常将其简化为并联的线性弹簧和阻尼器。轮对不设一系悬挂, 只设由空气弹簧组成的二系悬挂^[11-12]。

利用多体动力学软件建立跨座式单轨车辆模型, 如图 3 所示。该模型共计 38 个自由度, 车辆主要动力参数, 如表 1 所示。

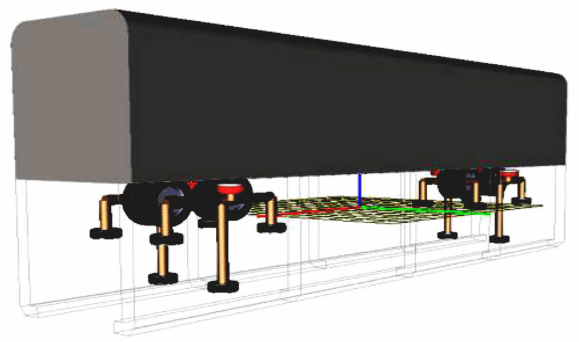


图 3 跨座式单轨车辆模型
Fig. 3 Model of straddle monorail vehicle

表 1 车辆主要动力参数
Tab.1 Main dynamic parameters of vehicle

参数	数值	参数	数值
车厢的长度、宽度、高度/m	14.80,2.90,3.59	导向轮、稳定轮的径向刚度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	980,980
车辆定距/m	9.6	走行轮径向阻尼/ $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	3 180
车体质量/kg	16 100	走行轮自由直径/m	1.006
构架质量/kg	6 170	导向轮、稳定轮自由直径/m	0.73,0.73
空气弹簧竖向、横向刚度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	160,10	走行轮轴距/m	1.5
空气弹簧竖向、横向阻尼/ $\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$	45 400,1 000	导向轮轴距/m	2.5
走行轮径向刚度/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$	1 180		

2.2 模型的验证

为验证模型的正确性,设置 $u=0$,车速 v 分别为 10,20,30,40,50,60,65 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,轨道线型为直线,轨道不平顺均采用常用且贴切的美国六级谱进行模拟,单轨车辆依次运行,并提取单轨车辆横向、竖向加速度数据.将处理后的仿真数据与文献[13]中实测的重庆轻轨加速度数据进行对比.仿真数据与实测数据的对比,如表 2 所示.表 2 中: a_v 为竖向加速度; a_l 为横向加速度.

表 2 仿真数据与实测数据的对比

Tab.2 Comparison of simulation data and measured data

$v/$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	$a_v/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$		$a_l/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$		$v/$ $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	$a_v/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$		$a_l/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	
	实测	仿真	实测	仿真		实测	仿真	实测	仿真
10	0.11	0.09	0.04	0.07	50	0.62	0.45	0.29	0.23
20	—	0.22	—	0.09	60	0.50	0.57	0.31	0.23
30	0.40	0.31	0.14	0.16	65	0.67	0.61	0.34	0.25
40	0.50	0.38	0.26	0.21					

当车速为 65 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,单轨车辆的加速度时程图,如图 4 所示.由图 4 可知:这些曲线是车体加速度的典型时程曲线.

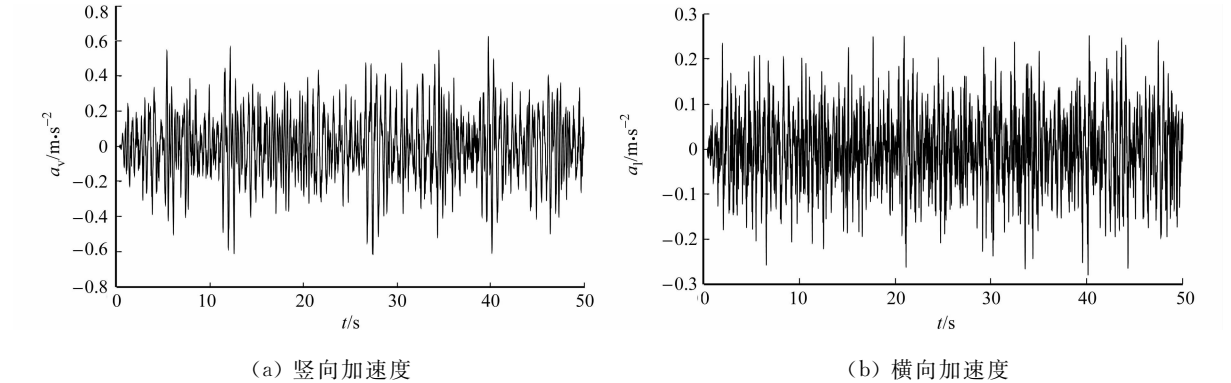


图 4 单轨车辆的加速度时程图

Fig.4 Acceleration time chart of monorail vehicle

由表 2 和图 4 可知:模型仿真加速度与重庆实测数据^[13]基本吻合.因此,可采用文中建立的仿真模型进行跨座式单轨车辆的动力学性能研究.

3 动力响应分析及平稳性能评价

3.1 车辆受风载大小的主要影响因素

分析两种风载模型在横风扰动作用下单轨车辆的动力响应情况,由式(3)~(5)可知,车辆受风载大小的主要影响因素为车速、风速和合成风向角,且横风对头车影响最大,故可对头车进行动力响应分析,进而评价整车动力响应及运行平稳性.

模拟单轨车辆在不同工况下的运行情况,即不同车速、风速和合成风向角的单轨车辆车体质心处横向加速度的时域历程曲线,轨道线型为直线轨道(长度 $L=500\text{ m}$)^[14].为便于研究车辆的横向振动,在

单轨车辆动力响应分析及平稳性能评价中未考虑轨道不平顺。

3.2 平稳性能评价分析

目前,国内外尚未制定专用于跨座式单轨车辆的平稳性评价标准,因此,借鉴 GB/T 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》,基于仿真获取的单轨车辆横向加速度振动响应时程曲线进行数值计算^[15-16]。平稳性指标 W 采用斯佩林平稳性指标的计算方法,即

$$W = 7.08 \times \sqrt{\sum_{i=1}^{10} a_i^3 F(f_i) / f_i}.$$

上式中: a_i 为振动加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; f_i 为振动频率, Hz ; $F(f_i)$ 为频率修正系数。

当含有 h 个频率成分时,平稳性指标计算式为

$$W = \sqrt[10]{W_1^{10} + W_2^{10} + W_3^{10} + \cdots + W_h^{10}}.$$

按上述标准,计算各控制变量下的单轨车辆平稳性指标。参考 GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》的客运轨道车辆平稳性评价,如表 3 所示。

3.3 合成风向角对车体质心处横向加速度的影响

设置仿真时间为 20 s,步长为 0.02,瞬态中国帽风载模型和非定常随机风载模型的风速均为 $u = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,合成风向角分别为 $45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ$,单轨车辆以 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度稳定运行,在 t_1 时刻分别驶入横向风带,车体质心处的横向加速度,如图 5 所示。

由图 5 可知:在两种风载模型中,当合成风向角为 90° 时,横向加速度最大;当合成风向角为 135° 时,横向加速度最小;当合成风向角为 $90^\circ, 75^\circ$ 时,横向加速度明显增大,说明角度不同,其等效风速也不同,车辆受到的风载相差较大;当合成风向角为 $75^\circ \sim 90^\circ$ 时,等效风速变化较大,横风对车辆安全性能有显著影响。

3.4 车速对车体质心处横向加速度的影响

设置仿真时间为 20 s,步长为 0.02,单轨车辆开始分别以 $10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的稳定速度运行, t_1 时刻驶入风速 $u = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的横风风带后离开,因合成风向角为 90° 时的等效风速最大,故后续研究的合成风向角均设置为 90° 。车速对车体质心处横向加速度的影响,如图 6 所示。

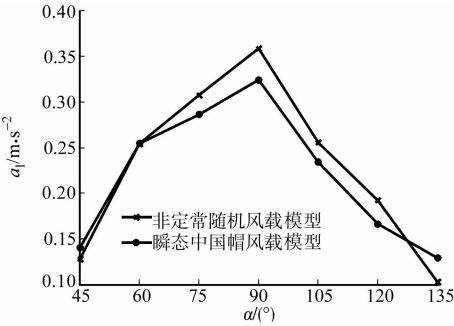


图 5 合成风向角对车体质心处横向加速度的影响
Fig. 5 Effect of synthetic wind direction angle on lateral acceleration at mass center of car body

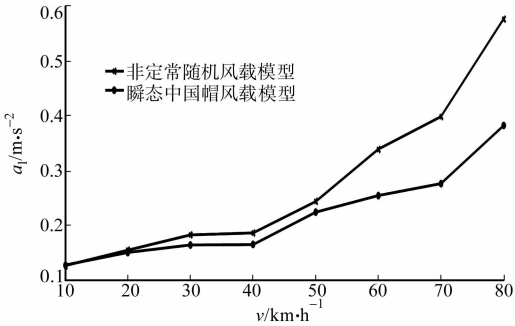


图 6 车速对车体质心处横向加速度的影响
Fig. 6 Effect of vehicle speed on lateral acceleration at mass center of car body

由图 6 可知:车体质心处横向加速度的最大值整体上随车速的增大而增大;由于抖振力和自激力的存在,相较于瞬态中国帽风载,非定常随机风载使单轨车辆的速度增幅更为明显,当车速增加至 $60 \sim 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,非定常随机风载作用效果更为明显,横向振动响应强烈。

根据仿真得到单轨车辆在两种风载模型下的时域历程曲线,将其导入 Matlab 进行计算,从而评价其运行的平稳性。当横风风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,单轨车辆在直线段轨道上以 $10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的车速行驶。在非定常随机风载模型中,单轨车辆以 $10 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度行驶,车体横向平稳性指标均未超过 2.50,车辆平稳性较好;以 $60, 70, 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度行驶,车体横向平稳性指标分别为 2.750 9, 3.050 7, 3.645 0,均不能满足车辆平稳运行的要求。在瞬态中国帽风载模型中,单轨车辆

以 $10\sim 60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度行驶,车辆平稳性较好;以 $70,80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度行驶,车体横向平稳性指标分别为 $2.584\ 2,3.048\ 9$,均超过 2.50 ,单轨车辆无法平稳行驶.

3.5 风速对车体质心处横向加速度的影响

当两种横向风速分别为 $5,10,15,20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,合成风向角均为 90° 时,作用于车速为 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的单轨车辆,其风速对车体质心处横向加速度的影响,如图 7 所示.

由图 7 可知:车辆横向加速度受风速的影响显著,随着风速的增加,横向加速度增大;当风速从 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,相较于瞬态中国帽风载,非定常风载作用下车体横向加速度折线更陡,对风速作用效果也更为敏感.

当车辆在直线段轨道上以 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的车速行驶时,在风速为 $15,20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的非定常随机风载和风速为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的瞬态中国帽风载的作用下,车体横向平稳性指标分别为 $2.750\ 9,2.961\ 3,2.704\ 8$,可相应地评为合格、合格和良.此时,单轨车辆应立刻减速甚至停运,以保证运行平稳性.其余各种工况评价结果均为优,可安全稳定运行.

4 横风扰动下跨座式单轨车辆运行的安全区域

跨座式单轨车辆以不同的车速分别通过瞬态中国帽风载模型、非定常随机风载模型,根据国家标准 GB 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》计算限值下的临界安全风速,进而基于这两条线的交点及最内侧部分确定安全区域与危险区域的分界线,依据该线可得到某车速下对应的安全运行所不能逾越的风速,从而得到横风扰动下单轨车辆运行安全域,当合成风向角为 $75^\circ\sim 90^\circ$ 时,等效风速变化较大,故所有风载均垂直于车体.

当车辆速度为 $0\sim 80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,平均侧风速度为 $0\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,单轨车辆运行安全区域与危险区域,如图 8 所示.

由图 8 可知:随着车辆运行速度的增加,车辆允许的临界安全风速降低.非定常随机风载模型曲线表示所有敏感条件的阈值界限集合,是安全区域与危险区域的边界.当风速为 $12.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,车辆临界速度约为 $73.4\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$;而若要保持车辆以车速 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 匀速行驶在轨道梁上,则标准高度风速检测应限制在 $11.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右.

非定常随机风载曲线右上区域为危险区域,表明跨座式单轨交通应关闭或使用风屏障等措施以保证行车安全.从风载模型来看,非定常随机风载模型的临界风速大于瞬态中国帽风载模型,非定常随机风载模型考虑了侧风下车体所受的抖振力和自激力.因此,在进行安全评估时,应选择非定常随机风载曲线的左下区域.

5 结论

- 1) 车速、风速、合成风向角对横风下单轨车辆的运行平稳性有着极大的影响,随着车速、风速的增大,单轨车辆运行平稳性越差;而当合成风向角为 $75^\circ\sim 90^\circ$ 时,车辆所受等效作用力最大,有脱轨可能.
- 2) 相较于瞬态中国帽风载模型,非定常随机风载模型使单轨车辆的横向振动响应更为明显.当风速为 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,车速增加至 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,瞬态中国帽风载模型的车辆速度达到 $70\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,车辆的

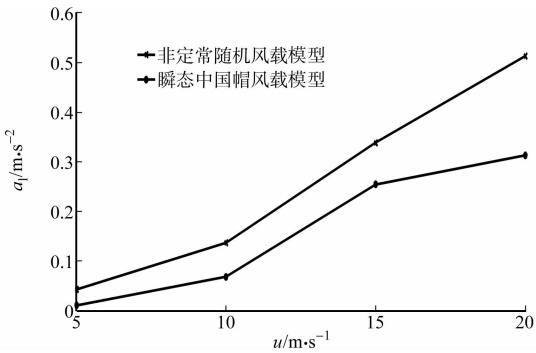


图 7 风速对车体质心处横向加速度的影响
Fig. 7 Effect of wind speed on lateral acceleration at mass center of car body

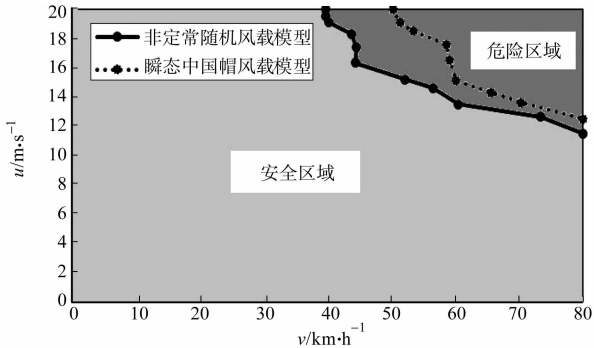


图 8 单轨车辆运行的安全区域与危险区域
Fig. 8 Safe and dangerous areas for monorail vehicles

横向振动响应过大,超过平稳性指标.

3) 给出横风扰动下单轨车辆运行安全区域,非定常随机风载曲线表示所有敏感条件的阈值界限集合,是安全区域与危险区域的边界.在安全区域中,车辆可稳定行驶;在危险区域中,跨座式单轨车辆应采取立即减速、就近停车等措施,以保证行车安全.

参考文献:

- [1] 彭祎恺,罗仁,胡俊波,等.不同侧风模型下的高速列车安全性研究[J].铁道车辆,2015,53(9):5-10. DOI:10.3969/j.issn.1002-7602.2015.09.002.
- [2] 王康.瞬态横风作用下的高速列车曲线通过安全性研究[J].新疆大学学报(自然科学版),2019,36(2):203-207. DOI:10.13568/j.cnki.651094.2019.02.012.
- [3] 曹亚博,凌亮,邓永权,等.强阵风环境下高速列车运行安全性研究[J].机械工程学报,2013,49(18):30-37. DOI:10.3901/JME.2013.18.030.
- [4] OLMOS J M, ASTIZ M Á. Non-linear vehicle-bridge-wind interaction model for running safety assessment of high-speed trains over a high-pier viaduct[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 419: 63-89. DOI:10.1016/j.jsv.2017.12.038.
- [5] ZHANG Mingjin, LI Yongle, WANG Bin. Effects of fundamental factors on coupled vibration of wind-rail vehicle-bridge system for long-span cable-stayed bridge[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(5): 1264-1272. DOI:10.1007/s11771-016-0376-5.
- [6] 赵树恩,刘浙,李玉玲.横风向对跨座式单轨车辆运行平稳性的影响[J].噪声与振动控制,2015,35(1):136-140, 155. DOI:10.3969/j.issn.1006-1335.2015.01.028.
- [7] 张云飞,李军.山区地铁车辆曲线通过时的风致安全性分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2019,40(3):291-297. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201811058.
- [8] 于梦阁,刘大维,张继业,等.二维随机风下高速列车非定常气动载荷研究[J].机械工程学报,2016,52(6):108-115. DOI:10.3901/JME.2016.06.108.
- [9] 于梦阁,张继业,张卫华.桥梁上高速列车的强横风运行安全性[J].机械工程学报,2012,48(18):104-111. DOI:10.3901/JME.2012.18.104.
- [10] 葛光辉,张楠,周爽,等.列车通过大跨度桥梁桥塔区域过程中的风车桥耦合动力分析[J].中国科学:技术科学,2014,44(7):793-800. DOI:10.1360/N092014-00090.
- [11] 李小珍,葛延龙,晋智斌.跨座式单轨车辆轨道梁耦合振动的计算分析[J].铁道工程学报,2018,35(1):78-83. DOI:10.3969/j.issn.1006-2106.2018.01.013.
- [12] 刘羽宇,王永虎.考虑轮胎侧偏特性的跨座式单轨车桥耦合振动模型[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(3):7-11,31. DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2015.03.02.
- [13] 乔志.跨座式单轨交通车辆-轨道梁耦合系统动力问题研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [14] 张云飞,李军.轨道客运车辆山区小半径曲线通过性能分析[J].华侨大学学报(自然科学版),2018,39(3):343-348. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201711036.
- [15] 文孝霞,杜子学,许舟洲,等.单轨车辆耦合动力学模型与振动响应特性[J].振动测试与诊断,2017,37(3):462-468,625. DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2017.03.007.
- [16] 赵树恩,罗宝良,李玉玲.考虑轮胎非线性特性的单轨车辆平稳性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(8):119-126. DOI:10.3969/j.issn.1674-0696.2018.08.20.

(责任编辑:钱筠 英文审校:崔长彩)